

**В.В. КНЯЗЕВ, С.И. МЕЛЬНИК****АДЕКВАТНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ПРЯМЫМ УДАРОМ МОЛНИИ НАЗЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПУТЕМ ИСПЫТАНИЙ НА МАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ**

Определение вероятности поражения элементов наземных конструкций, включая стартовые космические комплексы, численными методами рассмотрено в большом числе работ, часть из которых представлена в списке литературы. Понимание физики процесса и использование современных вычислительных возможностей обеспечивают получение достаточно точных данных о местах наиболее вероятного удара молнии. Однако, для новых конструкций, которые еще не получили апробации на практике, рекомендуется проводить экспериментальное исследование по определению вероятности удара молнии в области поверхности объекта. Для этого, создаются физические модели объекта, в уменьшенном масштабе. Модели должны обладать электрофизическими характеристиками, аналогичными реальному объекту. Масштаб модели выбирается с учетом удобства ее эксплуатации при экспериментальных исследованиях и возможностей высоковольтной испытательной установки (максимальным значением импульсного напряжения). Создание масштабной модели представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку необходимо максимально учесть особенности реального объекта. Для получения адекватных результатов испытаний требуется математическая обработка, что обуславливается необходимостью учесть физические ограничения, возникающие в процессе моделирования молнии. Рассмотрена математическая модель оценки адекватности результатов определения вероятности поражения прямым ударом молнии наземных конструкций путем испытаний на масштабной модели. Анализ предварительных результатов экспериментов показал, что использование высокоскоростных видеокамер в процессе испытаний не является эффективным, поскольку приводит к накоплению большого объема мало информативных данных. Кроме того, длительность разряда составляет микросекунды, вследствие чего при регистрации этот процесс может не записаться. Наиболее объективная информация получается при использовании фотокамер с длительной выдержкой. Проанализированы проблемы согласования существующих моделей различных стадий развития молниевых разрядов при макетных испытаниях. Показано, что модели развития молнии и длинной искры можно согласовать по отдельности для трех стадий: этап движения головки верхнего лидера до начала образования встречных лидеров; этап «ориентации» движения головки верхнего лидера за счет притяжения зарядами встречных лидеров; этап окончательного пробоя между сближившимися головками встречных лидеров («finaljump»). Разработана модель распределения положения головки нисходящего лидера до стадии «выбора и захвата». Обосновано подобие масштабного макетирования разряда молнии на стадии ориентировки нисходящего лидера одним из восходящих. Разработана методика адаптации макетного эксперимента в рамках вероятностной модели.

**Ключевые слова:** молния, вероятность удара, наземный объект, испытания, масштабная модель, корреляция результатов с реальной молнией.

**В.В. КНЯЗЬОВ, С.І. МЕЛЬНИК****АДЕКВАТНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ УРАЖЕННЯ ПРЯМИМ УДАРОМ БЛИСКАВКИ НАЗЕМНИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ ВИПРОБУВАНЬ НА МАСШТАБНІЙ МОДЕЛІ**

Визначення ймовірності ураження елементів наземних конструкцій, включаючи стартові космічні комплекси, чисельними методами розглянуто в великому числі робіт, частина з яких представлена в списку літератури. Розуміння фізики процесу і використання сучасних обчислювальних можливостей забезпечують отримання досить точних даних про місця найбільш ймовірного удару блискавки. Однак, для нових конструкцій, які ще не отримали апробацію на практиці, рекомендується проводити експериментальне дослідження з визначення ймовірності удару блискавки в області поверхні об'єкту. Для цього, створюються фізичні моделі об'єкта, в зменшеному масштабі. Моделі повинні володіти електрофізичними характеристиками, аналогічними реальному об'єкту. Масштаб моделі вибирається з урахуванням зручності її експлуатації при експериментальних дослідженнях і можливостей високовольтної випробувальної установки (максимальним значенням імпульсного напруги). Створення масштабної моделі являє собою досить складну задачу, оскільки необхідно максимально врахувати особливості реального об'єкта. Для отримання адекватних результатів випробувань потрібно математична обробка, що обумовлюється необхідністю врахувати фізичні обмеження, що виникають в процесі моделювання блискавки. Розглянуто математичну модель оцінки його результатів визначення ймовірності ураження прямим ударом блискавки наземних конструкцій шляхом випробувань на масштабній моделі. Аналіз попередніх результатів експериментів показав, що використання високошвидкісних відеокамер в процесі випробувань не є ефективним, оскільки призводить до накопичення великого обсягу мало інформативних даних. Крім того, тривалість розряду становить мікросекунди, внаслідок чого при реєстрації цей процес може не записатися. Найбільш об'єктивна інформація виходить при використанні фотокамер з тривалою витримкою. Проаналізовано проблеми узгодження існуючих моделей різних стадій розвитку блискавичного розряду при макетних випробуваннях. Показано, що моделі розвитку блискавки і довгої іскри можна узгодити окремо для трьох стадій: етап руху головки верхнього лідера до початку освіти зустрічних лідерів; етап «орієнтації» руху головки верхнього лідера за рахунок тяжіння зарядами зустрічних лідерів; етап остаточного пробоя між зближеними головками зустрічних лідерів («finaljump»). Розроблено модель розподілу положення головки спадного лідера до стадії «вибору і захоплення». Обґрунтовано подібність масштабного

макетування розряду блискавки на стадії орієнтування спадного лідера одним з висхідних. Розроблено методику адаптації макетного експерименту в рамках ймовірнісної моделі.

**Ключові слова:** блискавка, ймовірність удару, наземний об'єкт, випробування, масштабна модель, кореляція результатів з реальною блискавкою.

*V.V.KNIAZIEV, S.I. MEL'NYK*

### **ADEQUACY OF THE RESULTS OF DETERMINING THE PROBABILITY OF DAMAGE BY A DIRECT SHOCK OF LIGHTNESS OF A GROUND-DOOR DESIGN BY MEANS OF TESTS ON A SCALE MODEL**

The determination of the probability of damage to elements of ground structures, including launching space complexes, is considered by numerical methods in a large number of works, some of which are presented in the list of references. Understanding the physics of the process and the use of modern computing capabilities provide sufficiently accurate data on the places most likely to strike a lightning. However, for new designs that have not yet been tested in practice, it is recommended to conduct an experimental study to determine the likelihood of a lightning strike in the surface area of the object. For this, physical models of the object are created, on a reduced scale. Models must have electro physical characteristics similar to a real object. The scale of the model is chosen taking into account the convenience of its operation in experimental studies and the capabilities of the high-voltage test facility (maximum pulse voltage value). Creating a scale model is a rather complicated task, since it is necessary to take into account the features of a real object as much as possible. To obtain adequate test results, mathematical processing is required, which is caused by the need to take into account the physical limitations arising in the lightning modeling process. A mathematical model for assessing the adequacy of the results of determining the likelihood of a direct strike by lightning of ground structures by testing on a scale model is considered. An analysis of preliminary experimental results showed that the use of high-speed video cameras during the testing process is not effective, since it leads to the accumulation of a large amount of little informative data. In addition, the duration of the discharge is microseconds, so that during the registration this process may not be recorded. The most objective information is obtained when using cameras with long exposure. The problems of matching existing models of different stages of lightning discharge development during mock-up tests are analyzed. It is shown that the models of development of lightning and a long spark can be coordinated separately for the three stages: the stage of movement of the head of the upper leader before the formation of counter leaders; the stage of «orientation» of the movement of the head of the upper leader due to the attraction by the charges of the counter leaders; stage of the final breakdown between the converging heads of the counter leaders («final jump»). A model has been developed for the distribution of the position of the head of the downward leader to the «choice and capture» stage. The similarity of the scale prototyping of the lightning discharge at the stage of orientation of a descending leader is one of the ascending ones. A method of adapting a prototype experiment within a probabilistic model has been developed.

**Keywords:** lightning, probability of impact, ground object, tests, scale model, correlation of results with real lightning.

**Введение.** Для определения вероятности поражения прямым ударом молнии проводят эксперимент, в котором имитируют молниевый разряд с помощью специального оборудования [1]. При этом:

- последовательно размещают вертикальный стержень «А», на который подается импульс высокого напряжения, в узловых точках горизонтальной плоскости на заданной высоте;

- амплитуду импульса повышают до получения устойчивого разряда;

- в каждой узловой точке получают статистику распределения точек попадания канала разряда;

- усреднением полученных результатов по всем узлам сетки определяют вероятности поражения молнией различных зон исследуемых объектов.

Задачей настоящего исследования является анализ и аргументация соответствия результатов, полученных при масштабном макетировании молниевых разрядов реальному процессу. А также, оценка погрешности расчета вероятностей попадания молнии в различные точки наземных сооружений и объектов с помощью экспериментов, проведенных на масштабном макете.

Для ее решения разработана информационная модель процесса разряда молнии и проверена ее адекватность с помощью численного моделирования в среде COMSOL (версия 5.3a).

Общепризнанная стримерно-лидерная модель

образования молниевых разрядов предполагает несколько последовательных стадий, в основе которых лежат различные физические механизмы.

При моделировании молниевых разрядов на масштабном макете в идеальном случае требуется полное соответствие как физических стадий двух процессов, так и геометрического подобия параметров каждой стадии разряда молнии и разряда в лабораторных условиях. При масштабном макетировании процесса неявно предполагается, что:

- вертикальный стержень имитирует спускающийся лидер молнии;

- вероятность пробоя в ту или иную область конструкции равна вероятности попадания в аналогичную область оригинального изделия;

- искровой разряд от конца стержня к точке конструкции аналогичен молниевому разряду.

Однако, анализ подобных экспериментов и сравнение их результатов со статистикой попадания реальных молний в наземные объекты показывает [2], что полная физическая имитация молнии на макете невозможна.

Это связано, прежде всего, с тем, что геометрические параметры, характеризующие различные компоненты молниевых разрядов, такие как: характерный размер шага нисходящего ступенчатого лидера; длина финального скачка; характерный размер стримерной зоны; расстояние начала ориентации нисходящего

лидера в разной степени могут зависеть от разности потенциалов между элементами разряда, напряженности поля в различных точках макета, градиента напряженности, силы тока молнии.

В то же время, условия эксперимента предполагают возможность варьирования всего двух параметров импульса, подаваемого на верхний электрод: напряжение и длительность. Поэтому, обеспечить одновременно пропорциональное уменьшение геометрических параметров разряда молнии не представляется возможным.

В этой ситуации мы воспользовались возможностью отказаться от точной физической имитации молнии, а ограничились обеспечением лишь конечного результата – совпадения суммарной вероятности попадания в ту или иную область макета. Для этого воспользовались модифицированной версией вероятностного подхода к описанию процесса ориентации нисходящего лидера. Детали такого подхода и алгоритм моделирования описан далее.

Оказывается, что в этом подходе удастся нивелировать отличия параметров физических процессов, или скорректировать их соответствующими поправками к полученным результатам.

**Анализ процесса образования молнии и возможные упрощения.** Для построения упрощенной (информационной) модели формирования и ориентации молниевых разрядов проанализируем влияние отдельных этапов на распределение вероятности попадания.

Многочисленные экспериментальные исследования и феноменологические модели молнии [2-31] позволяют выделить следующие основные этапы этого процесса:

- из грозового облака начинает спускаться лидер. Траектория спускающегося лидера негативной полярности представляет собой случайную зигзагообразную линию;

- скачкообразный характер движения лидера возникает в результате стримерного механизма образования его канала. В промежутках между скачками в области головки лидера образуется множество стримеров, которые формируют объемный заряд перед головкой лидера, разогревают эту область и создают условия для следующего скачка;

- формирование и разогрев стримерной области, а также ее ориентация и размеры определяются в основном локальной напряженностью электрического поля вблизи текущего положения головки нисходящего лидера и параметрами состояния атмосферы в этой области;

- так как последние подвержены флуктуациям, то направление и длина следующего скачка головки лидера носит стохастический характер;

- при приближении к поверхности земли заряд нисходящего лидера начинает создавать на наземных объектах существенный заряд противоположного знака (дополнительно к зарядам, наведенным грозовой тучей);

- при достижении определенного уровня напря-

женности на выступающих острых концах наземных объектов возникают встречные лидеры;

- один из них своим зарядом «перехватывает» управление траекторией нисходящего лидера и сближается с ним;

- при достижении определенного значения напряженности между головками встречных лидеров возникает пробой воздушного промежутка.

При прямом переносе результатов оценки вероятности прямого удара, полученных в эксперименте, на реальную конструкцию возникают погрешности двух типов:

- погрешности, связанные с различием механизмов возникновения разряда в эксперименте и молнии;

- погрешности, возникающие в силу масштабирования макета наземных сооружений и конструкций.

Далее проанализируем погрешности, возникающие при переносе результатов макетирования на реальный объект для каждого из этапов формирования молнии в рассмотренной схеме. А затем максимально упростим описание тех этапов, пренебрежение точным описанием которых практически не влияет на окончательный результат.

*Этап движения головки верхнего лидера до начала образования встречных лидеров.*

Отличие макетного эксперимента от реального разряда молнии заключается в том, что сам лидер моделируется проводящим жестким стержнем, а его конечное положение фиксируется, после чего на стержень подается высокое напряжение. При этом в макетном эксперименте движение верхнего лидера до некоторой высоты вообще не моделируется, а весовой вклад в интегральное распределение вероятности попадания разряда молнии считается одинаковым для всех точек сетки. Однако, неоднородность поля зарядов, наведенных на наземных конструкциях, приводит к тому, что нисходящий лидер начинает ориентировку – смещение в сторону выступающих концов наземных сооружений, на расстояниях, существенно превышающих их высоту.

На этом этапе развития молнии значения напряженности поля вблизи острых концов наземных сооружений еще недостаточны для возникновения встречных лидеров и влияние наведенных зарядов может быть учтено на основании решения электростатической задачи. Влияние этого слабого поля можно свести к расчету поверхностей, разграничивающих силовые линии поля, попадающие в ту или иную область возможного удара молнии. Был разработан алгоритм такого расчета и проведены компьютерные эксперименты, подтверждающие его работоспособность.

Тем не менее, условия проведения макетного эксперимента (жестко заданное положение верхнего электрода на относительно малой высоте) не позволяют смоделировать слабые отклонения спускающегося с большой высоты лидера. В связи с этим нами разработан алгоритм коррекции результатов макетного эксперимента, который основан на численном решении электростатической задачи.

*Этап «ориентации» движения головки верхнего*

лидера за счет притяжения зарядами встречных лидеров

По мере снижения головки нисходящего лидера молнии электростатическое поле, наведенное на выступающих острых углах и ребрах наземных конструкций, увеличивается. Это приводит к тому, что интенсивность возникновения на них стримеров и их длина увеличиваются, температура стримерной области повышается, и возникают условия для образования встречных (восходящих) лидеров.

Далее головка одного из них оказывается в более выгодных условиях и «перехватывает» нисходящий лидер. Их дальнейшее движение навстречу друг другу не поддается простому моделированию. Однако на окончательное распределение вероятностей конкретный вид траектории сближения уже не оказывает существенного влияния.

Поэтому при анализе второго этапа образования молнии мы ограничимся оценкой вероятности «выбора» активного лидера из множества возникающих встречных лидеров.

Такой выбор связан со стохастичностью свойств воздуха в промежутке между электродами. Ранее (на предыдущем этапе работы) для численной оценки мы ограничились феноменологической моделью рассеяния точки попадания молнии, используя экспериментально известный параметр стохастичности - 10%. На этапе макетирования мы можем более точно исследовать этот процесс и уточнить сделанную ранее оценку вероятностей, опираясь на данные макетного эксперимента. Анализ модели этого этапа и алгоритм ее привязки к реальному молниевому разряду подробно описан далее.

*Этап окончательного пробоя между сближившимися головками встречных лидеров («finaljump»).*

На этом этапе происходит окончательное образование ионизированного проводящего воздушного канала между электродами. Естественно предположить, что при этом ранее образованные проводящие каналы встречных лидеров не меняют своего расположения. Поэтому этот этап не оказывает влияния на вероятность попадания молнии, и мы его рассматривать далее не будем.

#### **Обоснование оценки распределения вероятности попаданий молниевом разряда на основе данных макетного масштабного эксперимента**

Моделирование распределения положения головки нисходящего лидера до стадии «выбора и захвата». Отличие макетного эксперимента от реального разряда молнии заключается в том, что сам лидер моделируется проводящим жестким стержнем, а его конечное положение фиксируется до того, как на стержень подается высокое напряжение. При этом в макетном эксперименте движение нисходящего лидера вплоть до некоторой высоты вообще не моделируется, а задается априорно. В этой ситуации задача заключается в том, чтобы оценить погрешности макетирования, связанные с этим отличием, а также, по возможности, внести коррекцию в окончательные результаты.

Как показывают многочисленные эксперимен-

тальные исследования и разумные физические оценки, наведенные на наземных объектах заряды слишком малы, чтобы существенно влиять на траекторию движения ступенчатого лидера [3].

Очевидно, что при однородном вертикальном поле грозового облака случайные отклонения траектории лидера от вертикали симметричны. Если полагать, что плотность вероятности возникновения ступенчатых лидеров на большой высоте однородна, то координата головки лидера при ее снижении может существенно отклоняться от начального значения, но при этом распределение остается симметричным. Поэтому при снижении распределение вероятностей положения головки лидера остается почти однородным (неоднородность не более 5 %) вплоть до той высоты, на которой она вызывает возникновение встречных (восходящих) лидеров.

В эксперименте на макете эта однородность обеспечивается серией измерений с регулярным расположением конца электрода в узлах сетки на заданной высоте (рис 1). Для имитации однородности распределения реальных молний над объектом эта высота должна в несколько раз превышать высоту выступающих конструкций макета.

Кроме того, в силу того, что масштабному подобию соответствует только стадия «выбора и захвата» одним из восходящих лидеров нисходящего, высота расположения верхнего электрода должна приблизительно совпадать (в масштабе макета) с высотой, на которой начинается эта стадия.

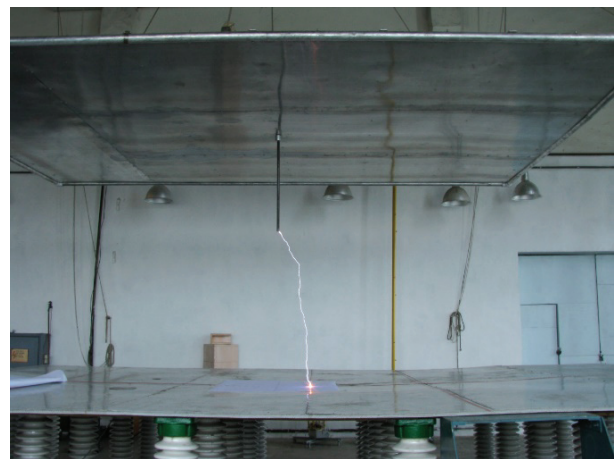


Рис. 1. Экспериментальное оборудование для моделирования молниевом разряда и определения вероятности попадания в различные зоны наземных объектов

Для учета возникающей при этом погрешности мы можем рассчитать (численным методом с помощью пакета COMSOL 5.3a) неоднородное распределение поля в плоскости расположения конца электрода, вызванное зарядами, наведенными на наземных конструкциях. Одно из таких иллюстративных распределений (при различном положении головки нисходящего лидера) показано на рис. 2. Для расчета вероятностей попадания молнии в конечное число зон поражения наземных конструкций в первом приближении достаточно рассчитать силовые линии, (в трехмерной

модели поверхности силовых линий), которые заканчиваются на границах этих зон.

Аналогичный принцип можно использовать и для корректировки неоднородности поля в макетных измерениях. Можно считать, что наиболее вероятная траектория ступенчатого лидера (до стадии возникновения встречного лидера) соответствует силовым линиям поля грозовой тучи [4].

Поэтому результаты, полученные при макетных измерениях для каждой из узловых точек (рис.1), следует умножить на соответствующий поправочный коэффициент. Этот коэффициент пропорционален напряженности неоднородного поля в плоскости расположения конца верхнего электрода (рис.4) и рассчитывается с учетом нормировки на единицу общей вероятности молниевых разрядов.

Заметим, что при этом поле грозовой тучи считается однородным, а неоднородность возникает только за счет влияния зарядов, наведенных на наземных конструкциях (без учета заряда нисходящего лидера). В приведенном примере вклад этой неоднородности в окончательное распределение вероятности попадания молнии в элементы наземных конструкций достигает 3% (отличие между напряженностью поля над вершинами мачт и острием ракетоносителя).

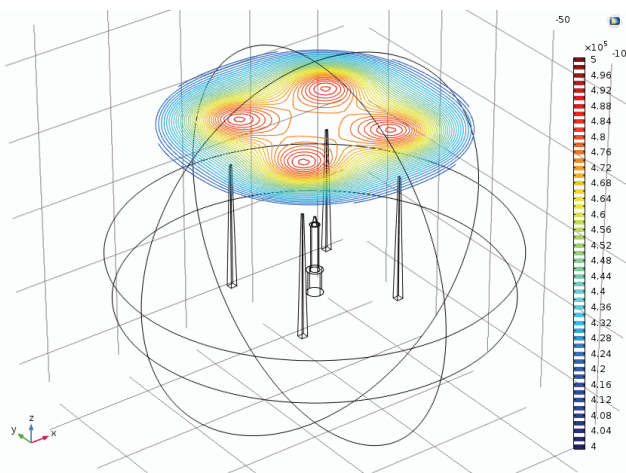


Рис. 2. Результаты численного расчета напряженности внешнего поля в плоскости расположения конца верхнего электрода при макетных экспериментах

### Вероятностный подход к определению точки удара молнии

Как следует из общепризнанного феноменологического описания процессов образования молнии или длинной искры, в них присутствует закономерная и стохастическая составляющие. Наиболее простым представлением описания такого типа является вероятностное распределение  $\varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}(U_f)$  пробивного напряжения  $U_f$  при заданной точке расположения головки ступенчатого лидера  $\vec{r}_{sl}$  и точке попадания искры на наземной конструкции  $\vec{r}_i$ . Если возможных точек (зон попадания) несколько, то подобное распределение вероятностей можно получить для каждой из них.

В случае, когда статистики попадания длинной искры из  $\vec{r}_{sl}$  в  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  независимы, вероятностная модель позволяет рассчитать статистику попадания в пару этих точек одновременно  $\varphi_{[\vec{r}_{sl}, (\vec{r}_1, \vec{r}_2)]}(U_f)$ . А также – относительную вероятность попадания в каждую из них [3].

При подаче напряжения от общего источника в эти точки вероятность пробоя одного из двух разрядных промежутков определяется по формулам:

$$P_1 = \int_0^\infty \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f) [1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f)] dU_f;$$

$$P_2 = \int_0^\infty \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f) [1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f)] dU_f; \quad (1)$$

где  $\Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f) = \int_0^{U_f} \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f') dU_f';$   
 $\Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f) = \int_0^{U_f} \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f') dU_f'$  и  $P_1 + P_2 = 1$ .

Распределение вероятности напряжения пробоя для системы двух точек определяется формальным соотношением:

$$\varphi_{[\vec{r}_{sl}, (\vec{r}_1, \vec{r}_2)]}(U_f) = \int_0^{U_f} \{ \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f') [1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f')] + \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f') [1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f')] \} dU_f'. \quad (2)$$

Как показано в многочисленных экспериментах, распределение  $\varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}(U_f)$  хорошо аппроксимируется гауссоидой:

$$\varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}(U_f) \approx \dots \varepsilon_e^{-\frac{U_f - U_f[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}{2\sigma_{U_f[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}^2}}. \quad (3)$$

При этом параметры распределения  $U_f[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]$  и  $\sigma_{U_f[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}^2$  зависят от расположения пары точек (концов длинной искры). Первая из них задана положением  $\vec{r}_{sl}$  конца верхнего электрода, а вторая ( $\vec{r}_i$ ) – положением одной из возможных точек попадания искры или их набором.

*Проблемы, возникающие при использовании вероятностного подхода к определению точки удара молнии для близко расположенных объектов.*

Заметим, что в эксперименте по определению  $U_f$  на макете сначала конец электрода помещают в точку  $\vec{r}_{sl}$ , а затем плавно повышают напряжение на нем до получения длинной искры. В отличие от этого, при опускании ступенчатого лидера молнии разность потенциалов между его головкой и наземными объектами остается практически постоянной, в то время как меняется расположение  $\vec{r}_{sl}$  головки лидера. Поэтому, пробой в реальной молнии надо описывать статистикой  $\omega_{U_f}(\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i)$  – плотностью вероятности того, что ориентировка ступенчатого лидера, возникновение встречного лидера и пробой между ними произойдут из точки  $\vec{r}_{sl}$  расположения первого при заданном напряжении  $U_f$  и конечной точке попадания  $\vec{r}_i$ .

Для согласования этих двух статистик необходи-

мо сделать дополнительные феноменологические предположения. Так, например, в [4, раздел 5.5] предполагают, что средние пробивные напряженности поля равны для различных  $\vec{r}_{sl}$  и  $U_f$ , тем самым жестко привязывая две статистики одну к другой.

В дальнейшем именно это допущение и приводит к «полному провалу теории», по выражению авторов [4], при близком расположении возможных точек попадания (получению расчетной вероятности 0,4 при фактической 0,01). Далее мы построим более корректную связь этих статистик и воспользуемся вероятностным подходом для привязки результатов макетирования к реальным вероятностям попадания молнии.

#### Учет стримерной стохастичности для алгоритмизации процедуры «перехвата» одним из входящих стримеров ориентации головки нисходящего лидера

Заметим, что в качестве объяснения взаимного влияния близко расположенных наземных объектов авторы [4] привлекают эффект подавления зарядом уже возникшего встречного лидера поля близлежащих возможных мест попадания. В результате оказывается, что даже при возникновении множества встречных лидеров активным оказывается первый из них, в то время как остальные лишь пассивно меняют конфигурацию поля и искривляют траекторию основного лидера.

Мы далее также будем придерживаться этой концепции выбора одного из встречных лидеров. По крайней мере, будем считать, что вероятность нарушения этого правила слишком мала, чтобы существенно повлиять на результат моделирования.

При этом мы учитываем, что могут существовать и ранее возникшие встречные лидеры. Но будем считать, что они затухнут до того, как начнут оказывать влияние на ориентацию ступенчатого лидера и вероятность возникновения последующих встречных лидеров.

В этом приближении вероятность возникновения «активного» встречного лидера (того, который формирует длинную искру между собой и ступенчатым лидером) зависит только от напряженности поля вблизи наземных конструкций. А она, в свою очередь, от состояния атмосферы и текущего положения головки ступенчатого лидера  $\vec{r}_{sl}$ .

Другими словами, статистики возникновения длинной искры между головкой ступенчатого лидера ( $\vec{r}_{sl}$ ) и двумя точками возникновения встречного лидера ( $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ ) можно считать независимыми, если записывать их не для пробивного напряжения, а для напряженности поля в локальной области вблизи рассматриваемого острия.

При этом средняя локальная напряженность поля рассчитывается как решение электростатической задачи при заданном напряжении между головкой ступенчатого лидера и землей.

Некорректность применения формул вероятностного подхода при близком расположении наземных

электродов заключается не в том, что пренебрегают влиянием уже возникшего встречного лидера на параметр случайного разброса  $\sigma_f$ . Мы полагаем, что причина в пренебрежении их взаимным влиянием на среднюю локальную напряженность электрического поля вблизи точек возможного образования встречных лидеров.

Ошибка может возникать потому, что в статистике среднего по всей длине значения напряженности, рассчитанного как

$$\overline{E_f} = \frac{U_f}{|\vec{r}_{sl} - \vec{r}_i|} = E_f(\vec{r}_i) \quad (4)$$

учтено не взаимное расположения электродов (и электростатическое влияние друг на друга), а только расстояние между ними и головкой ступенчатого лидера.

Для корректного перехода от статистики макетных экспериментов к статистике реальных молниевых разрядов необходимо учитывать не просто расстояния до мест возможного попадания, а локальную напряженность электрического поля, индуцированного в этих местах.

При этом на остриях наземных конструкций напряженность поля уменьшается за счет процесса ионизации и коронного разряда. Поэтому необходимо учитывать напряженность не на самой поверхности проводника, а на некотором расстоянии, равном характерной длине возникающих стримеров.

Таким образом, как и в вероятностном методе, мы будем рассматривать стохастическую модель «выбора» точки попадания, но связывать ее случайный характер не с разностью потенциалов между электродами, а со стохастическими изменениями значения напряженности поля вблизи вероятной точки попадания, при которой возникнет встречный лидер.

Будем считать, что приближенно она может быть задана функцией Гаусса, как и экспериментальное распределение напряжений пробоя.

$$\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0}) \approx \dots \varepsilon_e \frac{\overline{E_{r_0}} - E_{r_0}}{2\sigma_{fE}^2} \quad (5)$$

Здесь  $E_{r_0}$  – фактическая напряженность поля на расстоянии  $r_0$  от точки возможного попадания искры (молнии), а  $\overline{E_{r_0}}$  – ее среднее значение.

Недостатком такого подхода является сложность вычисления (оценки)  $\overline{E_{r_0}}$  для различных вариантов расположения наземных сооружений. Однако, с другой стороны, именно это и позволяет учесть взаимное влияние различных областей возможного удара уже на стадии моделирования. Более того, в первом приближении мы можем считать, что параметры  $r_0$ ,  $\overline{E_{r_0}}$ ,  $\sigma_{fE}^2$  одинаковы для различных областей, так как они зависят, в основном, от физики образования стримеров и свойств воздуха, и только потом от формы электродов.

Другим недостатком такого подхода является тот факт, что в эксперименте мы меряем зависимость



$\varphi_{[\vec{r}_{sl}, (\vec{r}_1, \vec{r}_2)]}(U_f)$ , а не  $\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0})$ . Тем не менее, мы можем получить аналитическую связь этих статистик для простой конструкции (например, прямой стержень заданной высоты). А затем, на основании экспериментальных данных  $\varphi_{[\vec{r}_{sl}, (\vec{r}_1, \vec{r}_2)]}(U_f)$  для этой конструкции рассчитать и  $\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0})$ .

Заметим, что при фиксированном положении электродов в макетном эксперименте  $\overline{U_{r_0}}/\sigma_{fE}^2 = \overline{U_f}/\sigma_U^2$ . Решая электростатическую задачу отдельно для каждой начальной точки расположения головки ступенчатого лидера  $\vec{r}_{sl}$ , и используя функцию  $\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0})$ , мы, в принципе, можем рассчитать вероятности попадания длинной искры (или молнии) в различные точки наземных конструкций при заданном значении  $\vec{r}_{sl}$ . Для этого необходимо использовать вероятностный подход к определению точки удара молнии.

Если дополнительно задать плотность вероятности того, что головка ступенчатого лидера окажется в точке  $\vec{r}_{sl}$ , то интегрируя по всей плоскости расположения  $\vec{r}_{sl}$ , мы получим общее распределение вероятностей попадания искры в различные области наземных конструкций. Таким образом, после описанной корректировки вероятностная модель длинной искры может быть использована для расчета вероятностей попадания в различные точки наземных конструкций.

#### Адаптация макетного эксперимента в рамках вероятностной модели

Описанную выше вероятностную модель можно использовать как для реального объекта и реальной молнии, так и для уменьшенного макета. Проблема переноса полученных на макете результатов на реальный объект заключается в том, что хотя случайные процессы и описываются одинаковыми стохастическими моделями, их параметры, такие, как  $r_0$ ,  $\overline{E_{r_0}}$ ,  $\sigma_{fE}^2$ , могут быть различны.

Воспользуемся геометрическим подобием макета и оригинального объекта и адаптируем параметры макета для получения максимального соответствия результатов.

Прежде всего отметим, что геометрическое подобие обеспечивает и электростатическое подобие поля, наведенного спускающимся ступенчатым лидером. Для того, чтобы возникновение встречного лидера было с той же относительной вероятностью, необходимо пропорциональное уменьшение и остальных геометрических параметров модели.

Таким параметром является значение  $r_0$  – эффективное расстояние до поверхности, напряженность поля на которой определяет вероятность возникновения встречного лидера. Мы полагаем, что оно соответствует длине стримеров, генерируемых на поверхности электрода. Для определения этой длины используем данные экспериментов. В частности, в экспериментальных исследованиях установлено [2], что

«стримерам в составе стримерной вспышки удается пересечь межэлектродный промежуток длины  $d$ , только если отношение превышает определенное критическое значение, которое зависит от рода газа и его состояния. В воздухе при нормальных условиях в широком диапазоне».

Таким образом, можно полагать, что длина стримерной вспышки определяется расстоянием, на котором напряженность поля спадает до значения  $E_{cr}$ . Существенно то, что это значение одинаково в широком диапазоне межэлектродных промежутков (0,1-10 м). Можно предположить, что и для больших значений (недоступных в экспериментах) оно также меняется незначительно. Поэтому для обеспечения масштабного подобия стохастического закона образования встречных стримеров необходимо обеспечить такое же значение  $E_{cr}$  на пропорционально меньших расстояниях. Но это условие выполняется автоматически при пропорциональном уменьшении разности потенциалов между электродами (в соответствии с масштабным коэффициентом). Можно также учесть небольшие различия в значениях для разных масштабов и соответственно уменьшить разность потенциалов еще на 10-20 %.

Дополнительным условием подобия стохастических моделей является обеспечение одинаковости значений  $\overline{E_{r_0}}$ ,  $\sigma_{fE}^2$  при заданных значениях  $\vec{r}_{sl}$  и  $\vec{r}_i$  в объекте и в его макете. Ранее мы определили  $r_0$ , как эффективное расстояние до поверхности, на котором напряженность поля определяет вероятность возникновения встречного лидера. Как следует из [4], таким расстоянием можно считать расстояние, на котором напряженность поля равна  $E_{cr}$ . Но тогда значение напряженности поля на расстоянии, определенном таким образом, точно равно  $E_{cr}$ , а случайный разброс значений следует отнести к параметру  $r_0$ .

В результате, вместо стохастической модели (5) мы можем использовать модель случайной длины стримера  $\omega_{\vec{r}_{sl}}(\vec{r}_{0l}, \vec{r}_i)$  в которой функция распределения вероятности уже не является гауссоидой, а определяется спецификой электростатического поля вблизи наземных конструкций. Кроме того, она может быть различна для различных точек  $\vec{r}_i$  на их поверхности.

Таким образом, стохастическая модель длинной искры между заданными точками (положениями концов электродов) может быть интерпретирована следующим образом.

#### Феноменологическая интерпретация стохастичности результатов измерения напряжения пробоя

Приведенные выше аргументы сводятся к формированию нового модифицированного вероятностного подхода к определению вероятностей попадания молнии. Перечислим его основные положения:

Физической причиной стохастичности напряжения пробоя при заданных положениях электродов  $\vec{r}_{sl}$  и  $\vec{r}_i$  является случайные флуктуации свойств воздушного промежутка и процессов ионизации и т.п., про-

ходящих в нем при образовании длинной искры.

Экспериментальные данные показывают, что напряжение пробоя может быть описано формулой

$$\varphi[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i](U_f) \approx \varepsilon_e \frac{U_f - U_f[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}{2\sigma_U[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]} \quad (6)$$

Описанная выше модель формирования длинной искры (возникновение встречного лидера и последующее его сближение с нисходящим лидером) позволяет интерпретировать эту стохастичность, как следствие стохастичности расстояния  $r_0$ , на котором напряженность электрического поля, наведенного верхним лидером, равна  $E_{cr}$ .

Широко известный электро-геометрический метод определения возможных зон поражения может быть применен к полю, в котором стохастичность «выбора» одного из восходящих встречных лидеров сводится к стохастичности длины стримера (с напряженностью  $E_{cr}$  на конце стримера).

Для определения вероятностного распределения значений  $r_0(\vec{r}_i)$  для различных точек  $\vec{r}_i$  на поверхности наземных конструкций может быть использована экспериментальная зависимость (6) и решение электростатической задачи.

В масштабном макетном эксперименте подобие электростатических полей автоматически обеспечивает пропорциональное уменьшение значений  $r_0(\vec{r}_i)$  при сохранении вероятностных распределений.

Отметим, что напряженность поля в каждой точке пространства между электродами также подвержена флуктуациям. Будем считать, что среднее значение напряженности в ней соответствует решению электро-

статической задачи при заданной конфигурации проводящих электродов и поданного напряжения.

При случайном увеличении напряжения между электродами напряженность в каждой точке пространства увеличивается пропорционально напряжению и значение  $r_0$  также увеличивается. Однако, степень увеличения  $r_0$  может существенно зависеть от конфигурации поля. Проиллюстрируем возможность «пробоя» защитного поля системы молниезащиты на примере численного расчета в COMSOL.

На рис. 3 показаны результаты расчета изолиний напряженности электростатического поля, индуцированного на наземных конструкциях внешним однородным полем. Как видно из рисунка, при этом критическое значение напряженности ( $E_{1cr} = 4,65$  кВ/см) достигается на малом расстоянии от головки ракетно-носителя. Следующая за этой точкой область меньшей напряженности не позволяет стримерам, возникшим на головке ракетно-носителя, продвинуться дальше и «захватить» нисходящий лидер. В этом случае в соответствии с электро-геометрическим методом удар молнии будет перехвачен системой молниезащиты (попадет в верхушки мачт или соединяющие их проводящие тросы).

Однако, даже при 5%-м случайном скачке напряженности поля в этой области, минимальное значение в ней оказывается больше  $E_{cr}$  и стример, возникший на головке ракетно-носителя распространяется вплоть до точки В (в которой после 5 % повышения напряженность окажется равной  $E_{1cr}$ ). В этом случае он может «перехватить» ориентировку нисходящего лидера у стримеров, возникших на верхушках молниезащитных мачт.

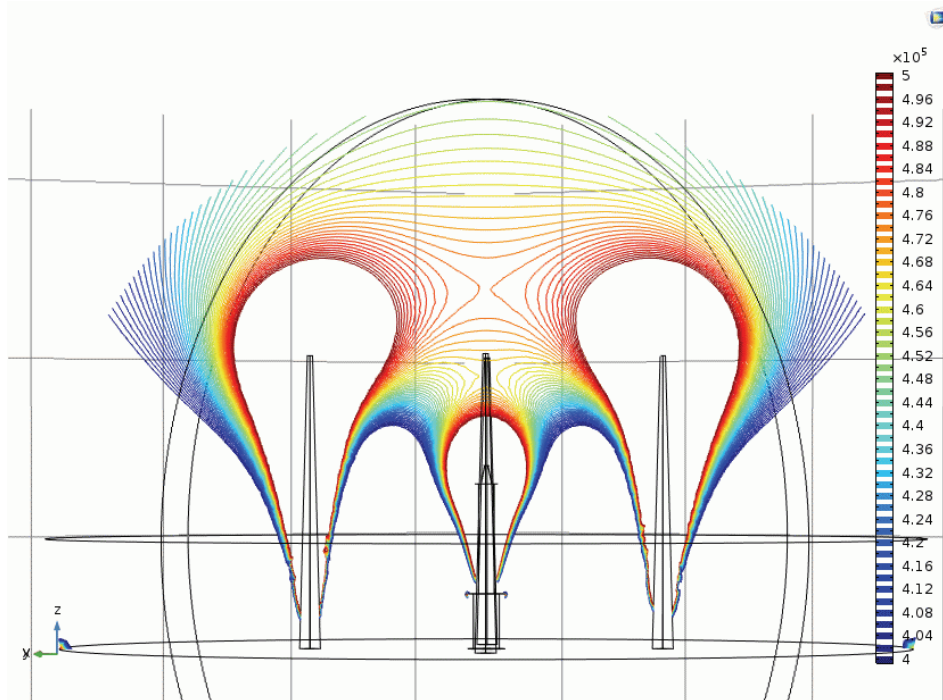


Рис.3. Иллюстрация возможности перехвата молнии ракетноносителем при случайной флуктуации напряженности поля и соответственного увеличения длины стримеров



Таким образом, в вероятностной модели пробоя длинной искры случайный характер пробоя и взаимное влияние близкорасположенных наземных конструкций могут быть учтены на уровне решения электростатической задачи и не требуют детального рассмотрения физики пробоя.

Дальнейший расчет вероятности попадания в ту или иную область при этом требует численного моделирования. Так как стохастичность процесса уже учтена при задании вероятностного характера скачков пробивного напряжения (и соответствующей напряженности поля) то дальнейший алгоритм может быть детерминирован. Так, например, можно считать, что после случайного скачка напряженности активным оказывается тот стример, головка которого находится на минимальном расстоянии от головки нисходящего лидера. Он перехватывает его ориентировку и формирует длинную искру.

В этом алгоритме случайные скачки напряженности в локальной близости от возможных точек попадания могут считаться независимым. Однако, даже в этом случае алгоритм требует многократного численного пересчета длин стримеров и достаточно сложен. Поэтому наиболее приемлемым методом оценки такой вероятности является натурный эксперимент с масштабным макетом.

В силу геометрического подобия полей, возникающих при одинаковых (на макете и на объекте) относительных скачках напряженности, изолинии  $E_{cr}$  также окажутся подобны. А это означает, что совпадут и относительные длины стримеров, генерируемых этими скачками. Поэтому относительные вероятности попадания молнии в различные области будут также совпадать для макета и объекта.

#### Предварительные экспериментальные исследования

##### Пробой в плоскую поверхность.

На рис. 4 показаны результаты макетного эксперимента, в котором исследовалась стохастичность мест попадания длинной искры в плоскую поверхность.

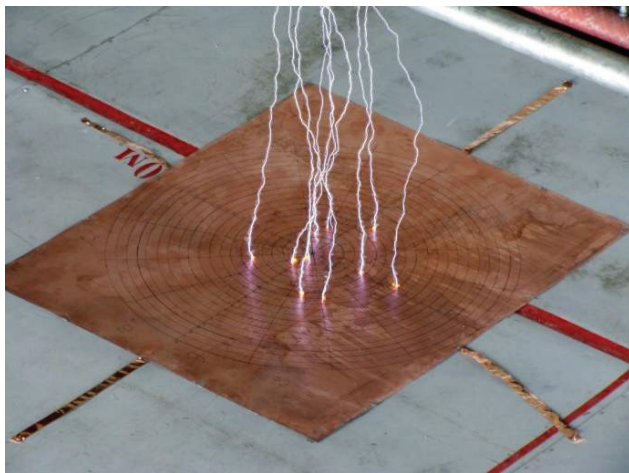


Рис. 4. Результаты предварительного эксперимента по определению функции распределения мест попадания длинной искры в плоскую поверхность

В этом эксперименте варьируется высота расположения конца электрода над плоской поверхностью. На него подается плавно повышающееся напряжение и фиксируется точка попадания длинной искры в нижний плоский электрод. Как видно из рисунка, полученные результаты позволяют (при достаточно большом количестве испытаний) определить функцию распределения  $\omega_h(U_f; \vec{r}_i)$  для каждой из высот  $h(\vec{r}_{sl})$  расположения конца верхнего электрода.

Специфика проводимого эксперимента заключается в том, что для плоской поверхности все возможные точки попадания находятся в равных условиях, а распределение напряженности электростатического поля над поверхностью может быть задано аналитически (при известных значениях  $U_f$  и  $h$ ). Используя это выражение для связи случайных параметров пробоя  $E_{r0} = E_{cr}$  и  $r_0(E_{cr})$ , мы можем, как проверить адекватность используемой стохастической модели (5), так и определить ее параметры  $E_{cr}$  и  $\sigma_{JE}^2$  из эксперимента.

Решаем электростатическую задачу. Считаем, что головка нисходящего лидера, обладающая зарядом  $q$ , находится на высоте  $h$  над бесконечной проводящей плоскостью. Тогда, методом электростатических изображений рассчитываем невозмущенное поле около плоскости:

$$E_r = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \frac{h}{(h^2 + r^2)^{3/2}}, \quad (7)$$

где  $r$  – расстояние в горизонтальной плоскости от точки симметрии. Вводим величину  $\omega(E)ds$  – вероятность того, что за единицу времени на участке площадью  $ds$  за счет флуктуаций будет достигнуто поле  $E$ . Предполагаем, что это распределение – гауссово (за постоянным коэффициентом перед гауссоидой дальше следить не будем, поскольку для результата будут важны только соотношения вероятностей).

$$\omega(E) \propto \exp\left\{-\frac{(E - E_r)^2}{\sigma^2}\right\}. \quad (8)$$

Для небольшого участка поверхности в точке  $r$  площадью  $ds$  вероятность того, что поле в ней превысит пороговое значение  $E_{cr}$ , пропорционально интегралу

$$\rho_r(E > E_{cr}) = \int_{E_{cr}}^{\infty} \omega(E) dE \propto \operatorname{erfc}\left(\frac{E_{cr} - E_r}{\sigma}\right), \quad (9)$$

где  $\operatorname{erfc}(x)$  – дополняющая функция ошибок.

Разобьем всю поверхность на концентрические кольца ширины  $dr$  вокруг центральной точки. Вероятность того, что за малый интервал времени от  $t$  до  $t + dt$  точка пробоя окажется в этом кольце, пропорциональна произведению вычисленной выше вероятности на площадь кольца, а значит, зависимость этой плотности вероятности от  $r$  имеет вид:

$$d\rho(r) \propto r \times \operatorname{erfc}\left(\frac{E_{cr} - E_r}{\sigma}\right) dt, \quad (10)$$

где  $E_r$  подставляется из формулы (7).

Пусть  $P_0(t)$  – вероятность того, что к моменту времени  $t$  не произошло ни одного пробоя. Тогда вероятность пробоя в кольцо  $dr$  за все время равна

$$P(r) = \int_0^\infty P_0(t) d\rho(r) = \int_0^\infty P_0(t) \times r \times \operatorname{erfc}\left(\frac{E_{cr} - E_r}{\sigma}\right) dt. \quad (11)$$

Как видим, независящая от времени часть выносятся из-под интеграла, а оставшаяся, по определению, дает интеграл единицу. Таким образом, финальное выражение для вероятности пробоя на расстоянии  $r$  от центра имеет тот же вид, что и плотность этой вероятности за единицу времени (10), а коэффициент пропорциональности определяется из нормировки плотности вероятности:  $\int_0^\infty P(r) dr = 1$ . Сравнивая последнее выражение с результатами эксперимента, подбираем параметры  $E_{cr}$  и  $\sigma$ .

Заметим, что входящий в формулу (7) параметр высоты заряда  $h$  соответствует конечному положению нисходящего лидера, после которого, в соответствии с нашим предположением, возникает встречный лидер, определяющий ориентацию нисходящего лидера. Но в рассматриваемом случае на любой из высот напряжение между электродами повышают до возникновения пробоя.

Для достаточно большой высоты  $h' > h$  нисходящий лидер возникает до того, как напряженность поля на поверхности пластины превысит критическую хотя бы в одной точке. До этого момента его движение хаотично, но не зависит от текущего положения головки. Если случайное отклонение от вертикали за один скачок не зависит от высоты его расположения над плоским электродом, то отклонение от центра описывается формулой случайных блужданий (двумерного броуновского движения).

$$\rho(x(z)=x) \propto e^{-\frac{x^2}{2\sigma_0^2(h'-h)}}; \quad \rho(y(z)=y) \propto e^{-\frac{y^2}{2\sigma_0^2(h'-h)}}. \quad (12)$$

Здесь изначально в качестве аргумента функций входило время движения  $t$ , но, предполагая в среднем постоянную скорость вертикального движения стримера, заменяем его на путь  $\Delta h = (h' - h)$  нисходящего лидера до той высоты  $h$ , на которой происходит «выбор» точки попадания.

Следовательно, дисперсия (среднеквадратичное отклонение от центра) координаты начального хаотического движения лидера рассчитывается по законам броуновского движения, и является линейным:

$$D_0(z) = \langle r(\Delta h)^2 \rangle = \langle x(\Delta h)^2 \rangle + \langle y(\Delta h)^2 \rangle = 4\sigma_0^2(\Delta h). \quad (13)$$

Тогда все выражения для распределения вероятности выходной точки встречного стримера остаются справедливыми, но отсчитываются от смещенного с такой дисперсией центра координат (поскольку все параметры задачи однородны в плоскости). Независимость этих двух смещений, по законам суммирования случайных величин, означает независимость и обычное суммирование их дисперсий:

$$D(h) = 4\sigma_0^2(h' - h) + D_1, \quad (14)$$

где  $h'$  – высота расположения конца верхнего электрода,  $h$  – высота расположения головки нисходящего лидера, на которой происходит «выбор» точки попадания,  $D_1$  – дисперсия конечной траектории стримера, определяющаяся из формулы (11). Поэтому зависимость дисперсии распределения точек попадания искры от высоты расположения конца электрода должна иметь вид смещенной от начала координат линейной функции, по наклону и смещению которой можно определить параметры  $\sigma_0^2$  и  $(4\sigma_0^2 h' + D_1)$ .

Поскольку точность вычисления дисперсии на каждой высоте определяется количеством измерений, на практике эта зависимость будет линейной только приближенно, и должна быть интерполирована. Характерный вид такой экспериментальной зависимости показан на рис. 5. Более точный анализ параметров модели будет сделан после проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Используя априорно заданное значение  $E_{cr} = 4,65$  кВ/см, можно оценить параметры  $\sigma_0^2$ ,  $h$  и  $D_1$  для распределений (11) и (12).

При оптимально подобранных значениях стохастической модели погрешности определения этих параметров могут быть определены путем сравнения экспериментальных и теоретических зависимостей ширины распределения точек попадания от высоты верхнего электрода. Таким образом, проведенный эксперимент и анализ его результатов позволяет подтвердить адекватность используемых в модели приближений и оценить погрешность, связанную с этими приближениями.

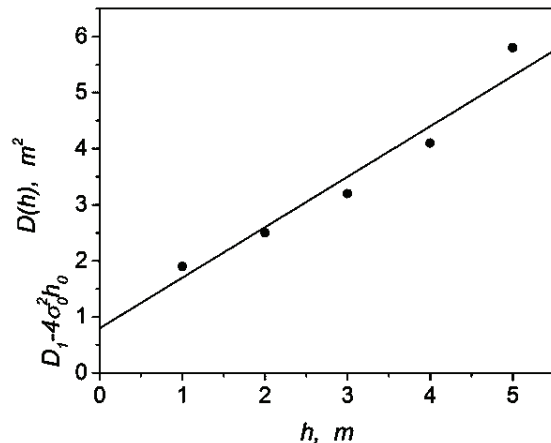


Рис. 5. Иллюстративный график возможных результатов эксперимента для определения параметров модели

#### Пробой в близко расположенные конструкции

Рассмотренный выше эксперимент не в полной мере отражает используемую нами модель пробоя, так как напряженность электростатического поля растет по мере удаления от плоского электрода. В связи с этим, возникший в той или иной точке поверхности стример (при выполнении условия  $E(\vec{r}_i) \geq E_{cr}$ ) далее

уже не затухает и идет на сближение с нисходящим лидером. Поэтому концепция случайной длины стримера в этой модели теряет свою актуальность.

В связи с этим мы рассмотрели также модель пробоя в две близко расположенные конструкции. В этом случае уже не удастся получить простое аналитическое выражение для напряженности электростатического поля. Поэтому мы использовали результаты численного счета, полученные в пакете COMSOL 3.5aAC/DC (лицензия № 9601339).

На рис. 6, а показана геометрия рассчитываемой системы электродов. Она соответствует эксперименту, описанному в [3, рис. 5.5]. На рис. 6, б показано распределение изолиний напряженности электростатического поля в этой системе.

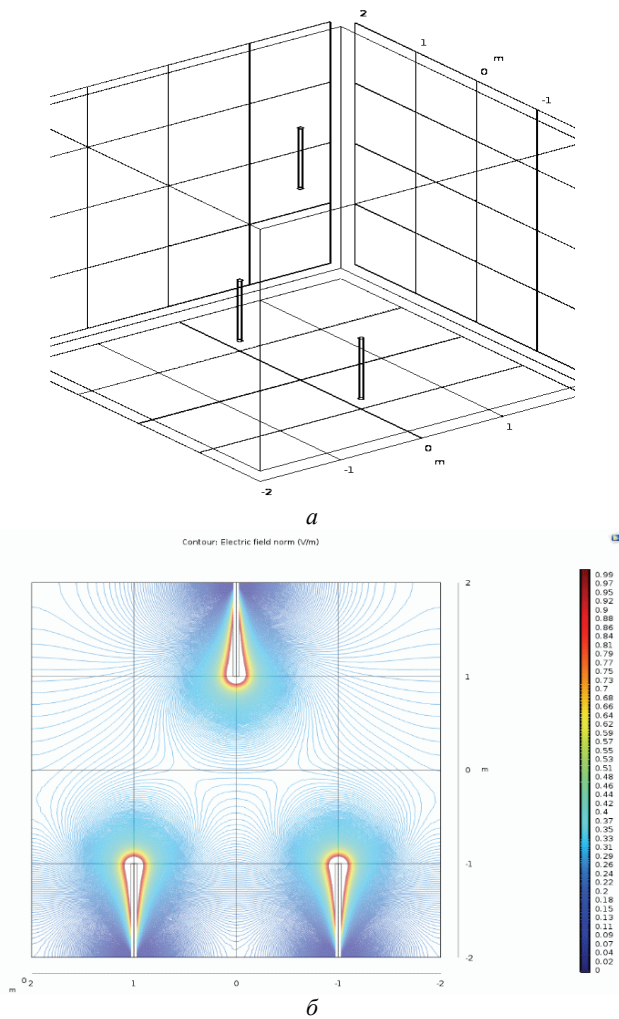


Рис. 6. Геометрия рассчитываемой системы электродов – (а); распределение изолиний напряженности электростатического поля в этой системе – (б)

На рис. 7 представлены соответствующие иллюстрации для аналогичного расположения электродов с расстоянием 10 см между ними.

В соответствии с разработанной моделью полагаем, что:

– на остриях нижних электродов под воздействием внешнего поля возникает высокая напряженность, которая приводит к образованию стримерной «по-

душки»;

– длина этих стримеров является случайной величиной, которая определяется напряженностью поля  $E_{cr} = 4,65$  кВ/см;

– в отсутствии флуктуаций решение электростатической задачи дает нам границу концов стримеров;

– если средняя напряженность между концом стримера и верхним электродом превышает пороговое значение  $E_0$  (согласно [7]  $E_0 = 5,00$  кВ/см), происходит финальная стадия пробоя («finaljump»);

– при наличии флуктуаций напряженности электростатического поля (описано выше) положение концов стримеров и образует «облако» вероятных точек;

– для первого из стримеров, между концом которого и верхним электродом окажется выполнено условие «finaljump», происходит «выбор» и дальнейшие стадии пробоя (включая возможное образование встречного лидера, его сближение с нисходящим лидером в реальной молнии).

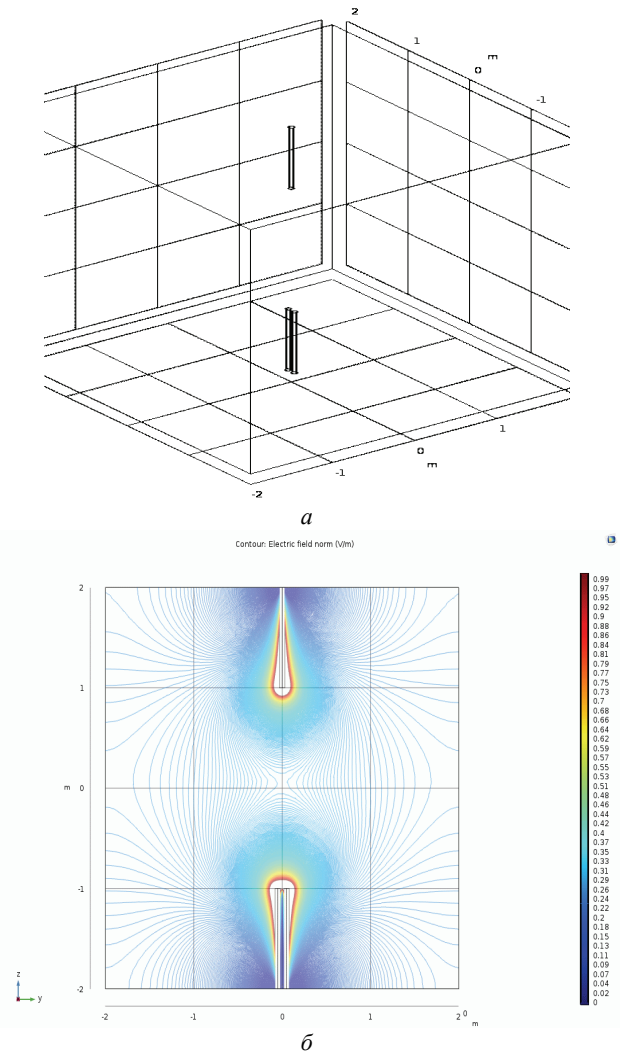


Рис. 7. Геометрия рассчитываемой системы электродов (расстояние 10 см) – (а); распределение изолиний напряженности электростатического поля в этой системе – (б)

Точный расчет вероятностей пробоя при различных напряжениях и сравнение с экспериментом требуют разработки специального алгоритма и его про-

граммирования. Это планируется сделать на следующем этапе исследований.

### Анализ погрешностей макетного моделирования

Источниками погрешностей при проведении макетного моделирования могут служить несколько факторов:

- погрешности, связанные с неполным соответствием физических процессов, происходящих при пробое молнии и искры в макетном эксперименте;
- погрешности экспериментального определения вероятностей на макете;
- погрешности оценки численных параметров, входящих в используемую модель;
- погрешности математических вычислений, необходимых для получения окончательного результата макетирования.

Проанализируем каждый из этих источников погрешности по отдельности.

*Погрешности, связанные с неполным соответствием физических процессов, происходящих при пробое молнии и искры в макетном эксперименте*

Это основной источник погрешностей, о неизбежности которого было сказано выше. Тем не менее, вносимая им погрешность может быть оценена и сведена к минимуму выбором оптимальных параметров моделирования. В описанной выше методике проведения эксперимента такими параметрами являются:

- высота расположения плоскости конца верхнего электрода;
- характерное время нарастания напряжения на электроде;
- выбор максимального значения напряжения, обеспечивающего 50 % или 90 %-й или др. пробой межэлектродного пространства.

Как следует из анализа соответствия физических процессов, связанных с пробоем молнии или длинной искры, основной стадией пробоя, влияющей на погрешность моделирования, является стадия «выбора» нисходящим лидером встречного лидера и их последующей ориентировки.

Для оценки степени соответствия этой стадии в реальной молнии и модели (и связанной с этим величиной погрешности) предлагается следующая методика:

- сбор экспериментальных данных (или использование ранее полученных данных) вероятности попадания молнии в наземную конструкцию;
- моделирование этой конструкции и ее масштабного макета в среде COMSOL 3.5.a;
- проведение экспериментальных исследований распределения вероятности попадания длинной искры на макете;
- оптимизация параметров модели для наилучшего совпадения расчетных данных с экспериментальными:
  - для реальной конструкции,
  - для макета;
- оценка погрешности, вызванной перенесением параметров модели, полученных для макета, на мо-

дель реального объекта.

Фактически, эта методика позволяет предсказать, насколько данные макетных исследований (после их математической обработки и адаптации параметров) можно будет использовать для предсказания вероятности попадания молнии в реальный объект (для которого оптимальные параметры модели нам неизвестны).

По предварительным (качественным) оценкам эта погрешность не будет превышать разброса пробивных напряжений (5-10 %). Окончательная оценка погрешностей этого рода будет проведена после получения необходимых экспериментальных результатов.

*Погрешности экспериментального определения вероятностей на макете*

Этот источник погрешностей связан с параметрами точности аппаратуры, используемой при измерениях и количеством испытаний, необходимых для оценки вероятности.

Для оценки этого количества будем полагать, что разброс значений количества попаданий в ту или иную область макета описывается нормальным распределением. Тогда при среднем количестве попаданий пробоя в  $i$ -ю область  $\bar{N}_i = \omega_i N$  флуктуацию этого количества можно оценить, как  $\delta N_i \approx \sqrt{\bar{N}_i}$ . Ошибка в расчете вероятности  $\omega_i$  при такой флуктуации составит  $\delta \omega_i = \frac{\delta N_i}{N} = \left( \sqrt{\omega_i} \right) \frac{1}{\sqrt{N}}$ .

Если, например, вероятность попадания в «защищенные» части наземных конструкций  $\omega_i$  не должна превышать 1%, то для оценки этой вероятности с точностью, не хуже  $\delta \omega_i = 10\%$  необходимо зафиксировать не менее  $N'$  случаев пробоя в наземную конструкцию, где  $10^{-3} = \sqrt{10^{-2}} \frac{1}{\sqrt{N'}}$ , откуда  $N' \approx 10^2$ .

*Погрешности оценки численных параметров, входящих в используемую модель*

Ранее показана возможность экспериментально-теоретической оценки погрешностей параметров модели. Используя формулы (7-14) мы можем оценить и влияние этих погрешностей на точность окончательного результата (оценки вероятностей пробоя молнии в ту или иную зону).

*Погрешности математических вычислений, необходимых для получения окончательного результата макетирования*

В рамках предложенной методики расчета использованы как результаты численного моделирования (модели в пакете COMSOL 3.5a), так и аналитические расчеты. Так как мы ограничиваемся решением электростатической задачи и последующим расчетом стационарных вероятностных распределений, компьютерных ресурсов (оперативной памяти и т.п.) достаточно, чтобы обеспечить необходимую точность этих вычислений. Их погрешность должна быть на порядок меньше наибольшей из остальных погрешностей, чтобы ее вкладом можно было пренебречь.

Окончательная оценка погрешности макетных



экспериментов и последующего их пересчета на реальный объект будет проведена после получения необходимых экспериментальных данных.

### Выводы

Проанализированы проблемы согласования существующих моделей различных стадий развития молниевых разрядов при макетных испытаниях.

Показано, что модели развития молнии и длинной искры можно согласовать по отдельности для трех стадий:

- этап движения головки верхнего лидера до начала образования встречных лидеров;
- этап «ориентации» движения головки верхнего лидера за счет притяжения зарядами встречных лидеров;
- этап окончательного пробоя между сближившимися головками встречных лидеров («finaljump»).

Разработана модель распределения положения головки нисходящего лидера до стадии «выбора и захвата».

Обосновано подобие масштабного макетирования разряда молнии на стадии ориентировки нисходящего лидера одним из восходящих.

Разработана методика адаптации макетного эксперимента в рамках вероятностной модели.

Проанализированы результаты предварительных экспериментальных исследований для двух случаев:

- пробой в плоскую поверхность;
- пробой в близко расположенные конструкции.

Проанализированы источники погрешностей при макетном моделировании вероятности пробоя и предложены методы их оценки.

В дальнейшем, планируется разработка численно-аналитических алгоритмов адаптации результатов макетного эксперимента для получения вероятностного распределения пробоя молнии на реальной конструкции.

### Список литературы

1. Базелян Э. М., Райзер Ю. П., Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией [The mechanism of lightning attraction and the problem of lightning initiation by lasers]. УФН, 170:7 (2000). С. 753–769.
2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. Москва, изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. Москва: Физматлит, 2001. 320 с.
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Москва: Изд-во Интеллект, Долгопрудный, 2009.
5. Молния и молниезащита / Александров Г. Н.; отв. ред. Козлов Г. Н.; Рос. акад. наук, Институт электрофизики и электроэнергетики. Москва: Наука, 2008, 274 с.
6. Lightning Electromagnetics. Vernon Cooray. The Institution of Engineering and Technology; 1st edition (June 12, 2012). 976 p.
7. Rakov V.A., Uman M.A. Review and evaluation of lightning returnstroke models including some aspects of their application. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998; **40** (4). PP. 403–26.
8. Rachidi F., Rakov V.A., Nucci C.A. Bermudez J.L. The effect of vertically-extended strike object on the distribution of current along the lightning channel. Journal of Geophysical Research, 2002; **107** (D23). P. 4699.

search, 2002; **107** (D23). P. 4699.

9. Podgorski A.S., Landt J.A. Numerical analysis of the lightning-CN tower interaction. 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, 1985.

10. Heidler F., Zundl T. Influence of tall towers on the return stroke current. Presented at Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity. Williamsburg, VA, 1995.

11. Baba Y., Ishii M. Numerical electromagnetic field analysis of lightning current in tall structures. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001; **16** (2). PP. 324–328.

12. Kordi B., Moini R., Janischewskyj W., Hussein A., Shostak V., Rakov V.A. Application of the antenna theory model to a tall tower struck by lightning. Journal of Geophysical Research, 2003; **108** (D17).

13. Harrington R.F. Field Computation by Moment Methods. New York: IEEE & Wiley, 1993.

14. Visacro S., Silveira F.H. Evaluation of lightning current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model. Journal of Electrostatics, 2004. **60**. PP. 111–120.

15. Silveira F.H., Visacro S., De Conti A.R. Lightning effects on the vicinity of elevated structures. International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, 2004.

16. Zundl T. Lightning current and LEMP calculations compared to measurements gained at the Peissenberg tower. 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest, Hungary, 1994.

17. Guerrieri S., Heidler F., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. Extension of two return stroke models to consider the influence of elevated strike objects on the lightning return stroke current and the radiated electromagnetic field: comparison with experimental results. EMC '96 ROMA. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Univ. Rome 'La Sapienza', Rome, Italy. 1996. Vol. 2.

18. Guerrieri S., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents. IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. **13** (4). PP. 1543–1555.

19. Guerrieri S., Krider E.P., Nucci C.A. Effects of traveling-waves of current on the initial response of a tall Franklin Rod. International Conference on Lightning Protection, Rhode, Greece, 2000. 908 Lightning electromagnetics.

20. Rusan I., Janischewskyj W., Hussein A.M., Chang J.-S. Comparison of measured and computed electromagnetic fields radiated from lightning strikes to the Toronto CN tower. 23rd International Conference on Lightning Protection, Florence, 1996.

21. Motoyama H., Janischewskyj W., Hussein A.M., Rusan R., Chisholm W.A., Chang J.S. Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures. IEEE Transactions on Power Delivery. 1996. **11** (3). PP. 1624–1632.

22. Rachidi F., Janischewskyj W., Hussein A.M., Nucci C.A., Guerrieri S., Kordi B. et al. Current and electromagnetic field associated with lightning return strokes to tall towers. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2001. **43** (3). PP. 356–367.

23. Janischewskyj W., Shostak V., Hussein A.M. Comparison of lightning electromagnetic field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower 1. Magnetic field. 24th International Conference on Lightning Protection, Birmingham, UK, 1998.

24. Janischewskyj W., Shostak V., Hussein A.M. Lightning electric field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower. 11th International Symposium on High Voltage Engineering. 1999. Vol. 467, no. 5. PP. 270–74.

25. Shostak V., Janischewskij W., Hussein A., Kordi B. Electromagnetic fields of lightning strikes to a tall tower: a model that accounts for upwardconnecting discharges. 25th International Conference on Lightning Protection. Rhodes, Greece, 2000.

26. Shostak V., Janischewskij W., Hussein A.M., Chang J.S., Kordi B. Returnstroke current modeling of lightning striking a tall tower accounting for reflections within the growing channel and for upward-connecting discharges. 11th International Conference on Atmospheric Electricity. Guntersville, AL, 1999.

27. Goshima H., Asakawa A., Shindo T., Motoyama H., Wada A., Yokoyama S. Characteristics of electromagnetic fields due to winter lightning stroke current to a high stack. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. Part B, 2000. **120** (1). PP. 44–49.

28. Bermudez J.L., Rubinstein M., Rachidi F., Heidler F., Paolone M. Determination of reflection coefficients at the top and bottom of elevated strike objects struck by lightning. Journal of Geophysical Research. 2003. **108** (D14). P. 4413.

29. Bermudez J.L., Rachidi F., Janischewskij W., Shostak V., Rubinstein M., Pavanello D. et al. Far-field – current relationship based on the TL model for lightning return strokes to elevated strike objects. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. **47** (1). PP. 146–159.

30. Baba Y., Rakov V.A. Lightning electromagnetic environment in the presence of a tall grounded strike object. Journal of Geophysical Research. 2005. **110**.

31. Rachidi F., Nucci C.A. On the Master, Uman, Lin, Standler and the modified transmission line lightning return stroke current models. Journal of Geophysical Research. 1990. **95** (D12). PP. 20389–20394.

## References (transliterated)

1. Bazeljan Je. M., Rajzer Ju. P. Mehanizm pritzazheniya molniii problema lazernogo upravleniya molnii [The mechanism of lightning attraction and the problem of lightning initiation by lasers]. Phys. Usp., 43: 7 (2000). PP. 701–716.

2. Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Iskrovoy razrjad. Moscow, izd-vo MFTI, 1997. 320 p.

3. Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Fizika molniii molniezashiti. Moscow: Fizmatlit, 2001. 320 p.

4. Rajzer Ju. P. Fizika gazovogo razrjada. Moscow: Izdatel'stvo Intellect, Dolgoprudnyj, 2009.

5. Molnija i molniezashiti / Aleksandrov G. N.; otv. red. Kozlov V. N.; Ros. akad. nauk, Institut jelektrofiziki jelektronergetiki. Moscow: Nauka, 2008. 274 p.

6. Lightning Electromagnetics. Vernon Cooray. The Institution of Engineering and Technology; 1st edition (June 12, 2012) 976 p.

7. Rakov V.A., Uman M.A. Review and evaluation of lightning returnstroke models including some aspects of their application. IEEE Transactionson Electromagnetic Compatibility. 1998. **40** (4). PP. 403–426.

8. Rachidi F., Rakov V.A., Nucci C.A., Bermudez J.L. The effect of vertically-extended strike object on the distribution of current along the lightning channel. Journal of Geophysical Research, 2002. **107** (D23). P. 4699.

9. Podgorski A.S., Landt J.A. Numerical analysis of the lightning-CN tower interaction. 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility. Zurich, Switzerland, 1985.

10. Heidler F., Zundl T. Influence of tall towers on the return stroke current. Presented at Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity. Williamsburg, VA, 1995.

11. Baba Y., Ishii M. Numerical electromagnetic field

analysis of lightning current in tall structures. IEEE Transactions on Power Delivery. 2001. **16**(2). PP. 324–328.

12. Kordi B., Moini R., Janischewskij W., Hussein A., Shostak V., Rakov V.A. Application of the antenna theory model to a tall tower struck by lightning. Journal of Geophysical Research. 2003. **108** (D17).

13. Harrington R.F. Field Computation by Moment Methods. New York: IEEE & Wiley, 1993.

14. Visacro S., Silveira F.H. Evaluation of lightning current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model. Journal of Electrostatics. 2004. **60**. PP. 111–120.

15. Silveira F.H., Visacro S., De Conti A.R. Lightning effects on the vicinity of elevated structures. International Conference on Lightning Protection. Avignon, France, 2004.

16. Zundl T. Lightning current and LEMP calculations compared to measurements gained at the Peissenberg tower. 22nd International Conference on Lightning Protection. Budapest, Hungary, 1994.

17. Guerrieri S., Heidler F., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. Extension of two return stroke models to consider the influence of elevated strike objects on the lightning return stroke current and the radiated electromagnetic field: comparison with experimental results. EMC '96 ROMA. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Univ. Rome 'La Sapienza', Rome, Italy. Vol. 2, 1996

18. Guerrieri S., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents. IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. **13** (4). PP. 1543–1555.

19. Guerrieri S., Krider E.P., Nucci C.A. Effects of traveling-waves of current on the initial response of a tall Franklin Rod. International Conference on Lightning Protection. Rhode, Greece, 2000. 908 Lightning electromagnetics.

20. Rusan I., Janischewskij W., Hussein A.M., Chang J.-S. Comparison of measured and computed electromagnetic fields radiated from lightning strikes to the Toronto CN tower. 23rd International Conference on Lightning Protection, Florence, 1996.

21. Motoyama H., Janischewskij W., Hussein A.M., Rusan R., Chisholm W.A., Chang J.S. Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures. IEEE Transactions on Power Delivery. 1996. **11** (3). PP. 1624–1632.

22. Rachidi F., Janischewskij W., Hussein A.M., Nucci C.A., Guerrieri S., Kordi B. et al. Current and electromagnetic field associated with lightning return strokes to tall towers. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2001. **43** (3). PP. 356–367.

23. Janischewskij W., Shostak V., Hussein A.M. Comparison of lightning electromagnetic field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower 1. Magnetic field. 24th International Conference on Lightning Protection. Birmingham, UK, 1998.

24. Janischewskij W., Shostak V., Hussein A.M. Lightning electric field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower. 11th International Symposium on High Voltage Engineering. 1999. Vol. 467, no. 5. PP. 270–274.

25. Shostak V., Janischewskij W., Hussein A., Kordi B. Electromagnetic fields of lightning strikes to a tall tower: a model that accounts for upwardconnecting discharges. 25th International Conference on Lightning Protection. Rhodes, Greece, 2000.

26. Shostak V., Janischewskij W., Hussein A.M., Chang J.S., Kordi B. Returnstroke current modeling of lightning striking a tall tower accounting for reflections within the growing channel and for upward-connecting discharges. 11th International Conference on Atmospheric Electricity. Guntersville, AL,



1999.

27. Goshima H., Asakawa A., Shindo T., Motoyama H., Wada A., Yokoyama S. Characteristics of electromagnetic fields due to winter lightning stroke current to a high stack. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. Part B. 2000. **120** (1). PP. 44–49.

28. Bermudez J.L., Rubinstein M., Rachidi F., Heidler F., Paolone M. Determination of reflection coefficients at the top and bottom of elevated strike objects struck by lightning. Journal of Geophysical Research. 2003. **108** (D14). P. 4413.

29. Bermudez J.L., Rachidi F., Janischewskyj W., Shostak V., Rubinstein M., Pavanello D. et al. Far-field – current rela-

tionship based on the TL model for lightning return strokes to elevated strike objects. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. **47** (1). PP. 146–159.

30. Baba Y., Rakov V.A. Lightning electromagnetic environment in the presence of a tall grounded strike object. Journal of Geophysical Research. 2005. **110**.

31. Rachidi F., Nucci C.A. On the Master, Uman, Lin, Standler and the modified transmission line lightning return stroke current models. Journal of Geophysical Research. 1990. **95** (D12). PP. 20389–20394.

Поступила (received) 20.04.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Князев Володимир Володимирович (Князев Владимир Владимирович, Kniaziev Volodymyr Volodymyrovych)** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7119-7790>; e-mail: knyaz2@i.ua.

**Мельник Сергій Іванович (Мельник Сергей Иванович, Mel'nik Sergiy Ivanovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Інститут радіофізики та електроніки НАНУ імені О.Я. Усикова, старший науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: smelnyk@yandex.ua.

УДК 621.316.99

**Д.Г. КОЛУШКО, С.С. РУДЕНКО, С.Г. БУРЯКОВСЬКИЙ**

#### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ ДОТИКУ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДІЮЧИХ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ

Напруга дотику є параметром, який характеризує електробезпеку обслуговуючого персоналу у випадку короткого замикання на території електроустановки чи поза її межами. Метою роботи є аналіз існуючих методів визначення напруги дотику для їх поточного контролю. Проведено аналіз світового та вітчизняного досвіду на основі порівняння експериментальних та розрахункових способів визначення нормованих параметрів заземлювального пристрою. Розглянуто метод короткого замикання, малого струму, кінцевих елементів в часовій області, інтегро-диференціальних рівнянь та оптичної аналогії. Визначено сфери використання існуючих методів розрахунку напруги дотику. Показано, що розрахункові методи дозволяють врахувати більшу кількість факторів та напряму охопити понад 80 % діючих енергооб'єктів України. Отримані результати дозволяють обрати оптимальний метод контролю стану заземлювального пристрою. Усунення виявлених недоліків методів дозволить підвищити точність визначення нормованих, а отже підвищити надійність роботи електроустановок та безпеку персоналу.

**Ключові слова:** електробезпека, заземлювальний пристрій, напруга дотику, коротке замикання, енергооб'єкт.

**Д.Г. КОЛИУШКО, С.С. РУДЕНКО, С.Г. БУРЯКОВСКИЙ**

#### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

Напряжение прикосновения является параметром, характеризующим электробезопасность обслуживающего персонала в случае короткого замыкания на территории электроустановки или за ее пределами. Целью работы является анализ существующих методов определения напряжения прикосновения для их текущего контроля. Проведен анализ мирового и отечественного опыта на основе сравнения экспериментальных и расчетных способов определения нормируемых параметров заземляющего устройства. Рассмотрен метод короткого замыкания, малого тока, конечных элементов во временной области, интегро-дифференциальных уравнений и оптической аналогии. Определены сферы использования существующих методов расчета напряжения прикосновения. Показано, что расчетные методы позволяют учесть большее количество факторов и направления охватить более 80% действующих энергообъектов Украины. Полученные результаты позволяют выбрать оптимальный метод контроля состояния заземляющего устройства. Устранение выявленных недостатков методов позволит повысить точность определения нормированных, а значит повысить надежность работы электроустановок и безопасность персонала.

**Ключевые слова:** электробезопасность, заземляющего устройства, напряжение прикосновения, короткое замыкание, энергообъект.

© Д. Г. Коліушко, С. С. Руденко, С. Г. Буряковський, 2019